

Встановлення умов утворення пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження обертового барабана

Ю. В. Науменко, К. Ю. Дейнека, Т. В. Мироненко

Оцінено вплив динамічних параметрів руху на утворення та зникнення на циліндричній поверхні камери обертового барабана пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження.

На основі результатів експериментальної візуалізації течії виявлено вплив зв'язності на поведінку зернистого завантаження. Встановлено гідродинамічний ефект квазізрідження завантаження під дією зв'язності, який полягає у виникненні зчипної взаємодії між сусідніми шарами та з поверхнею камери. Виявлено перетворення зсувної циркуляційної течії на однорідний щільний кластеризований потік зі сповзанням та перекочуванням без відносного руху частинок.

Встановлено гідродинамічні характеристики переходу циркуляційної течії у режим пристінкового шару, під час прискорення обертання. Такий перехід реалізується шляхом плавного зростання товщини шару при циркуляції решти завантаження у нижній частині камери.

Встановлено ефект реологічного гістерезису руху завантаження обертової камери, зумовлений квазізрідженням зв'язного зернистого середовища. Ефект полягає у перевищенні швидкісної межі $\omega_{\text{п}}$ утворення пристінкового шару, при прискоренні обертання, над межею $\omega_{\text{д}}$ зникнення шару, при сповільненні обертання. Прояв гістерезису переважно посилюється зі збільшенням числа Рейнольдса. Інтенсивність посилення прояву гістерезису зростає зі зменшенням ступеня заповнення камери. Значення числа Фруда для меж $\omega_{\text{п}}$ і $\omega_{\text{д}}$ зростає зі збільшенням Re . Встановлено, що при відносному розмірі частинок дисперсного завантаження $\psi_{\text{дс}} \approx (0,065-1,04) \cdot 10^{-3}$ та $Re=30-500$, $Fr=1-2,9$, для межі $\omega_{\text{п}}$, та $Fr=0,5-1,4$, для межі $\omega_{\text{д}}$. Виявлено перевищення значення Fr для межі $\omega_{\text{п}}$ над таким значення для межі $\omega_{\text{д}}$ у 1,6–2,1 рази.

Встановлені ефекти дозволяють обґрунтувати раціональні параметри процесу подрібнення в барабанно-валкових млинах.

Ключові слова: барабанно-валковий млин, зв'язне зернисте завантаження, утворення пристінкового шару, реологічний гістерезис.

1. Вступ

Машини барабанного типу широко використовуються у багатьох галузях виробництва для переробки різних текучих матеріалів. Універсальність такого обладнання полягає у можливості виконання різноманітних технологічних процесів при варіації експлуатаційних параметрів.

Режими руху оброблюваного в камері обертового барабана середовища визначаються співвідношенням дії гравітаційного та спотвореного, внаслідок відносного руху, відцентрового силового поля. За умови низької швидкості обер-

тання переважає дія гравітаційного поля, що зумовлює циркуляційний режим руху середовища в нижній частині камери. При великій кутовій швидкості відцентрове поле спричинює виникнення пристінкового режиму руху на циліндричній поверхні камери.

Для реалізації низки робочих процесів барабанних машин визначальним є умови переходу режимів руху оброблюваного середовища. Особливої актуальності ці умови набувають для барабанно-валкових млинів (Horomill) [1]. Такий помел полягає у дії тиском, за допомогою роздавлюючого валка, на вільну поверхню пристінкового шару подрібнюваного матеріалу на циліндричній поверхні горизонтально обертової камери. При цьому визначальним параметром реалізації процесу стає величина швидкості обертання барабана. При зниженому значенні швидкості не відбувається завершення утворення пристінкового шару матеріалу, що спричинює спадання продуктивності та тонини помелу. Натомість при завищеному значенні швидкості зростає динамічне навантаження на обладнання та енергоємність приводу обертання барабана. Видається, що раціональним є мінімальне значення швидкості обертання, яке є необхідним і достатнім для утворення і збереження стійкого пристінкового шару матеріалу під час подрібнення.

Разом з тим, умови переходу режимів руху встановлено лише для найбільш поширених видів оброблюваних середовищ – незв'язного зернистого матеріалу та ньютонівської рідини. Натомість в барабанно-валкових млинах подрібнюються переважно дрібнодисперсні зернисті матеріали, що проявляють зв'язні властивості. Реологічна поведінка такого середовища в обертовій камері є ще недостатньо з'ясованою, а умови переходу режимів течії невизначеними.

Задача прогнозування впливу динамічних параметрів руху на умови утворення та зникнення на поверхні обертової камери пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження видається доволі актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Результати дослідження поведінки зв'язного зернистого завантаження камери обертового барабана обмежуються розглядом особливостей впливу зчеплення частинок на циркуляційний режим руху.

Для розв'язання цієї задачі у низці робіт було застосовано чисельні методи. В [2] методом дискретних елементів (МДЕ) вивчався вплив зчеплення між частинками на картини руху завантаження у поперечному перерізі камери. Показано, що збільшення зв'язності зумовлює виникнення поверхневого натягу зернистого завантаження. При цьому встановлено зменшення вгнутості, наближення до плоскої та виникнення опуклої форми вільної поверхні завантаження. Виявлено збільшення товщини зсувного шару та відстані від вільної поверхні до ядра циркуляції. Зареєстровано перехід зсувного циркуляційного режиму руху у режим перекочування. Метод ДЕМ із експериментальною перевіркою застосовано в [3] для оцінки впливу зв'язності на режими руху завантаження. Встановлено посилення опуклості форми вільної поверхні, збільшення товщини зсувного шару та перехід від зсувної циркуляції до перекочування. В [4, 5] за допомогою ДЕМ та експериментально виявлено перехід режиму руху заванта-

ження із періодичним обрушення у неперервне перекочування. Встановлено зниження взаємного зштовхування частинок внаслідок дисипації кінетичної енергії з посиленням зв'язності. Виявлено підвищення однорідності зернистого потоку внаслідок посилення щільності упаковки частинок. Вільний рух окремих частинок, внаслідок кластеризації потоку, перетворюється на переміщення кластерних угруповань. Через посилення внутрішнього опору течії знижується швидкість руху та зсування потоку. Режим руху із періодичним обрушення, при малій швидкості обертання, перетворюється на неперервне перекочування. Встановлено збільшення товщини зсувного шару та опуклості вільної поверхні. Вплив зв'язності на режими руху вологого зернистого завантаження вивчалось методом ДЕМ в [6]. Встановлено, що із посиленням зв'язності збільшується товщина і однорідність зсувного шару та зменшується швидкість потоку, псевдо-температура середовища і взаємне зштовхування частинок.

Вплив зв'язності на режими руху завантаження вивчався також експериментально. В [7] досліджувались картини руху зернисто-рідинної суміші в режимі періодичного обрушення при повільному обертанні камери. Розглядався режим періодичного обрушення вільної поверхні при повільному обертанні. Встановлено зниження кута нахилу вільної поверхні та підвищення товщини зсувного шару зі суттєвим збільшенням зв'язності. Положення вільної поверхні та характер циркуляції центра мас вивчались в [8]. Виявлено перетворення зсувного ковзання завантаження у сповзання з перекочуванням зі збільшенням зчеплення. Встановлення утворення мікротріщин в зв'язному завантаженні, що викликані зсувними напруженнями. В [9] експериментально виявлено перехід зсувного режиму циркуляції зв'язного завантаження у плунжерний потік із перекочування без відносного руху частинок. При цьому зростає товщина зсувного шару, знижується рухливість частинок, а вгнута форма вільної поверхні переходить у майже плоску. Вплив зчеплення на рух вологого зернистого завантаження експериментально досліджувався в [10]. Виявлено підвищення внутрішнього опору руху та зниження зсування потоку зі збільшенням зв'язності. Встановлено зменшення зштовхування між частинками внаслідок дисипації кінетичної енергії. Показано збільшення висоту зсувного шару, зменшення швидкості потоку та посилення опуклості форми вільної поверхні.

Однак отримані дані не дозволили встановити умови утворення пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження на поверхні камери обертового барабана.

Прояв реологічних властивостей зв'язного зернистого матеріалу, як оброблюваного середовища машин барабанного типу, видається доволі складним. Разом з тим можна припустити, що його гідродинамічна поведінка є схожою із поведінкою більш простих за реологічними характеристиками незв'язного зернистого матеріалу та ньютонівської рідини. Натомість передбачувані аналогічні режими течії в обертовій камері окремо незв'язного зернистого та рідкого завантаження є відносно добре вивченими.

Відомі спроби визначення швидкості обертання барабана при утворенні та зникненні пристінкового шару незв'язного зернистого завантаження на гладкій циліндричній поверхні камери. У роботі [11] експериментально встановлено

значне зростання такої швидкості обертання зі зменшення ступеня заповнення камери. На основі експерименту та чисельного моделювання методом дискретних елементів (МДЕ) в [12] запропоновано враховувати вплив кута природного укосу завантаження на граничну швидкість обертання. Було встановлено два граничних значення швидкості обертання – на початку та в кінці утворення або руйнування пристінкового шару. В [13] експериментально з'ясовано вплив співвідношення густини рідкої та твердої фази двофракційного завантаження на швидкість обертання при утворенні пристінкового шару. Методом чисельного гідродинамічного моделювання в [14] оцінено вплив довжини барабана та несферичності форми частинок завантаження на значення граничної швидкості обертання. Проте надійних умов утворення пристінкового шару завантаження на поверхні камери встановлено не було.

Натомість характер режиму усталеного руху незв'язного зернистого завантаження у поперечному перерізі камери стаціонарно обертового барабана є трифазним [15]. На картині руху в поперечному перерізі камери можна умовно виділити три зони течії: твердотільну, невідного падіння та зсувного шару. Твердотільна зона [16] характеризується квазітвердотільним рухом без відносного переміщення частинок завантаження разом із циліндричною поверхнею камери. У зоні невідного падіння відбувається відокремлення частинок від твердотільної зони із подальшим падінням зі взаємодією. У зоні зсувного шару [17] виникає швидкий гравітаційний потік завантаження поблизу вільної поверхні.

Реалізація трьох зон течії визначається швидкістю обертання барабана ω . При повільному обертанні переважає твердотільна зона, зона невідного падіння є слабо вираженою, а зона зсувного шару має незначну товщину. Зі зростанням ω частки зони невідного падіння та зсувного шару збільшуються за рахунок твердотільної зони. Із подальшим зростанням ω частка зони невідного падіння досягає максимального значення, а зсувний шар зникає. При наближенні ω до граничного значення зона невідного падіння переходить у твердотільний пристінковий шар.

Характерні режими руху незв'язного завантаження обертового барабана (рис. 1) характеризуються комбінаціями трьох зазначених зон течії [18].

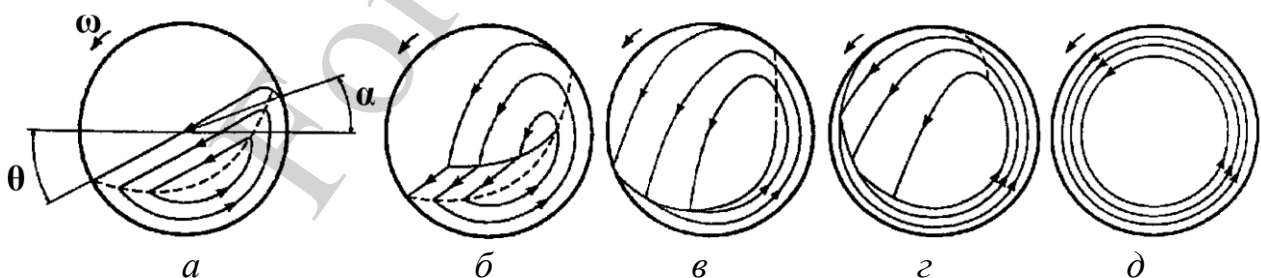


Рис. 1. Схеми режимів руху незв'язного зернистого завантаження камери обертового барабана за зростанням швидкості обертання ω (за [18]): а – режим без підкидання, б – режим з частковим підкиданням, в – режим із повним підкиданням, г – режим неповного центрифугування, д – режим пристінкового шару (центрифугування), θ – середній кут нахилу вільної поверхні завантаження до горизонталі, α – кут підйому завантаження

У режимі руху без підкидання (рис. 1, *а*) виникає тверdotільна та зона зсувного шару. У режимі з частковим підкиданням (рис. 1, *б*) реалізуються всі три зони. У режимі із повним підкиданням (рис. 1, *в*) зникає зсувний шар. У режимі неповного центрифугування (рис. 1, *з*) починає утворюватись пристінковий шар із поступовим зменшенням зони невідного падіння. Режим зсувного шару (рис. 1, *а*) характеризується лише тверdotільною зоною. Утворення та зникнення на поверхні камери обертового барабана пристінкового шару незв'язного зернистого завантаження пов'язано зі взаємними переходами режимів із повним підкиданням (рис. 1, *в*), неповного (рис. 1, *з*) і повного (рис. 1, *д*) центрифугування.

У роботі [18] експериментально було визначено умови існування пристінкового шару незв'язного зернистого матеріалу у широкому діапазоні варіацій параметрів системи. Розглядався двовимірний усталений рух завантаження у поперечному перерізі циліндричної камери радіуса R стаціонарно обертового навколо горизонтальної осі з кутовою швидкістю ω барабана. Як динамічні критерії подібності було прийнято число Фруда Fr та число Рейнольдса Re на циліндричній поверхні камери. Як вирази для динамічних критеріїв було прийнято $Fr = (\omega^2 R)/g$ та $Re = (\omega R^2)/\nu$ (g – гравітаційне прискорення, ν – аналог кінематичної в'язкості зернистого завантаження). Геометричні та фрикційні характеристики використаного для експерименту незв'язного зернистого матеріалу приблизно відповідали параметрам внутрішньокамерного завантаження машин барабанного типу. Порівняльний аналіз із картинами течії ньютонівської рідини в обертовій камері дозволив приблизно оцінити значення аналогу кінематичної в'язкості зернистого завантаження – $\nu \approx 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Як геометричний критерій подібності було прийнято ступінь заповнення камери завантаженням $\kappa = w/(\pi R^2 L)$ (w – об'єм зернистого завантаження у стані спокою, L – довжина камери).

На рис. 2 в координатах Re і Fr для чотирьох дискретних значень κ наведено експериментальні межі переходу режимів руху незв'язного зернистого завантаження [18].

Межа ω_{bfebl} відповідає початку формування пристінкового шару при збільшенні швидкості обертання ω та одночасно завершенню руйнування шару при зменшенні ω . Межа ω_{bfebl} відповідає взаємному переходу режимів руху із повним підкиданням (рис. 1, *в*) та неповного центрифугування (рис. 1, *з*). Зона вище межі ω_{bfebl} відповідає режиму неповного центрифугування (рис. 1, *з*), а нижче – режиму із повним підкиданням (рис. 1, *в*). Положення межі ω_{bfebl} практично не залежить від ступеня заповнення камери завантаженням κ .

Межа ω_{efbdl} відповідає завершенню формування пристінкового шару при збільшенні швидкості обертання ω та одночасно початку руйнування шару при зменшенні ω . Межа ω_{efbdl} відповідає взаємному переходу режимів неповного центрифугування (рис. 1, *з*) та пристінкового шару (центрифугування) (рис. 1, *д*). Положення межі ω_{efbdl} визначається величиною κ . Зона вище межі ω_{efbdl} відповідає режиму руху у вигляді пристінкового шару (рис. 1, *д*), а нижче – режиму неповного центрифугування (рис. 1, *з*).

У роботі [18], для порівняння, було також наведено виявлені умови існування пристінкового шару рідкого заповнення камери у широкому діапазоні варіацій параметрів системи. На рис. 3 в координатах Re і Fr для п'яти дискрет-

них значень к зображено встановлені експериментально-аналітичним методом межі переходу режимів течії. Межа ω_{fl} відповідає утворенню пристінкового шару при прискоренні обертання барабана. Межа ω_{dl} відповідає руйнуванню шару при сповільненні обертання.

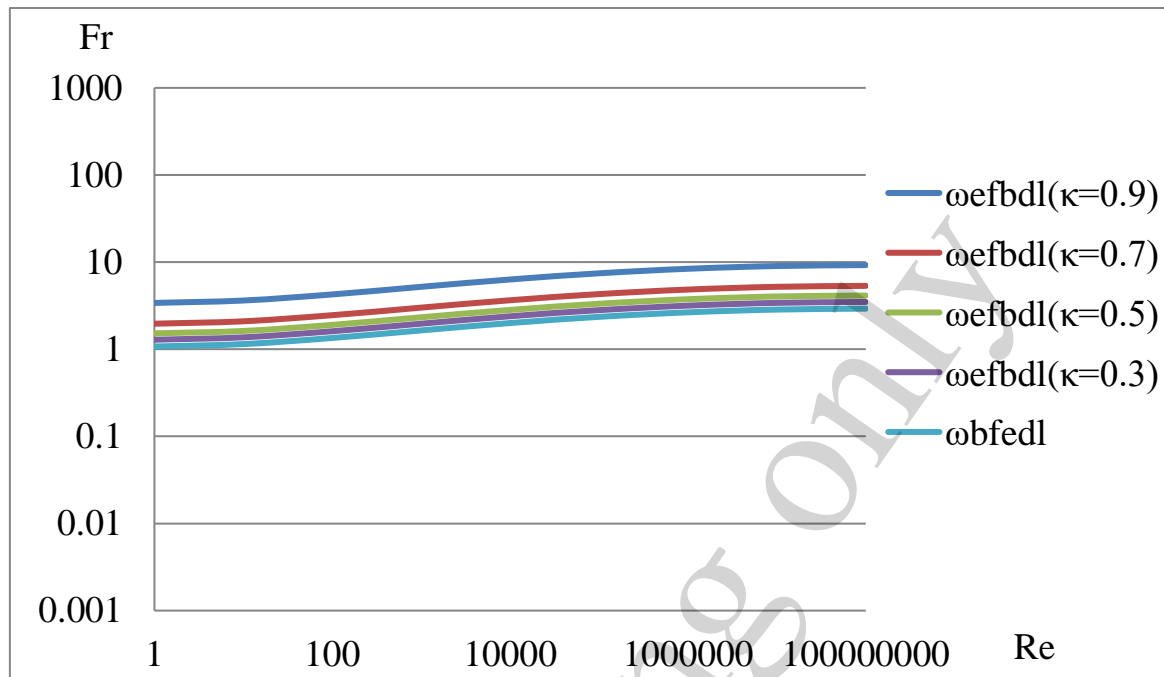


Рис. 2. Експериментальні межі переходу режимів руху незв'язного зернистого завантаження обертового барабана для $\kappa=0,3, 0,5, 0,7$ та $0,9$ (за [18]): ω_{bfedl} – межа взаємного переходу режимів руху із повним підкиданням та неповного центрифугування; ω_{efbdl} – межа взаємного переходу режимів неповного центрифугування та пристінкового шару

При порівнянні результатів визначення меж переходу режимів руху в обертовій камері незв'язного зернистого матеріалу та ньютонівської рідини було виявлено їх принципові відмінності. Вони полягають у виникненні гістерезисного переходу режимів течії рідини та практичній відсутності прояву такого переходу для незв'язного матеріалу.

Величини меж переходу режимів руху цих двох поширених реологічних типів оброблюваних середовищ суттєво залежать від Re та κ . Порівняльний аналіз рис. 2, 3 засвідчив ідентичність окремих умов існування пристінкового шару цих двох середовищ при наближенні Re до граничних значень [18]. При $Re \rightarrow \infty$ межі ω_{efbdl} для зернистого матеріалу та ω_{dl} для рідини відповідають умові $Fr \rightarrow 3/(1-\kappa)^{0,5}$, а межа ω_{bfedl} для зернистого матеріалу – $Fr \rightarrow 3$. При $Re \rightarrow 0$ межі ω_{efbdl} для зернистого матеріалу та розрахункова межа для рідини за [19, 20] відповідають умові $Fr \rightarrow 1/(1-\kappa)^{0,5}$, а межа ω_{bfedl} для зернистого матеріалу – $Fr \rightarrow 1$.

Отже реологічний гістерезис течії рідини має явно виражений прояв, а можливий фрикційний гістерезис руху незв'язного зернистого завантаження є малопомітним. Натомість технологічне застосування реологічного гістерезисного

переходу режимів руху при утворенні пристінкового шару оброблюваного внутрішньокамерного завантаження видається доволі актуальним.

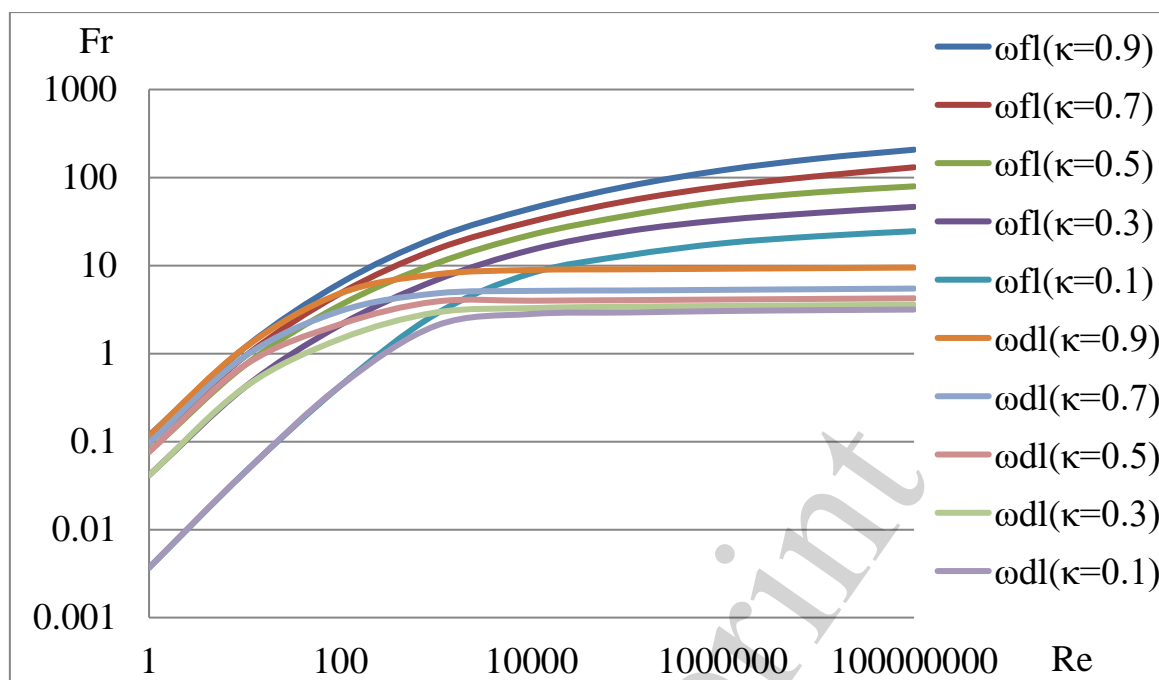


Рис. 3. Експериментально-аналітичні межі переходу режимів течії ньютонівської рідини в обертовій камері для $\kappa=0,1, 0,3, 0,5, 0,7$ та $0,9$ (за [18]): ω_{fl} – межа утворення режиму пристінкового шару при прискоренні обертання; ω_{dl} – межа руйнування режиму пристінкового шару при сповільненні обертання

Перший відомий експериментальний аналіз умов переходу режимів течії малов'язкої ньютонівської рідини при малому заповненні камери обертового барабана наведено в [21, 22]. Було встановлено явище активного прояву реологічного гістерезису в'язкої течії, що супроводжує утворення та зникнення пристінкового шару на циліндричній поверхні камери. Виявилось, що значення швидкості, при прискоренні обертання та утворенні шару, може суттєво перевищувати таке значення, при сповільненні обертання та руйнуванні шару. У роботі [23] виконано чисельний розрахунок із експериментальної перевіркою умов стійкості тонкого пристінкового шару реальної рідини на поверхні обертової камери. Показано, що із підвищенням в'язкості реологічний гістерезис режимів течії може не виникати. Розбіжність між результатами аналітичної моделі та експериментальними даними щодо умов існування рідкого пристінкового шару у випадку варіації в'язкості виявлено в [24]. У роботі [25] виконано чисельний розрахунок із експериментальної перевіркою реологічного гістерезису рідини високої та низької в'язкості. Виявлено розбіжність чисельних та експериментальних даних для умов існування пристінкового шару у випадку малов'язких рідин. Експериментальний аналіз режимів течії в [26] показав відсутність прояву реологічного гістерезису у випадку малого ступеня заповнення камери та високої в'язкості. У [27] експериментально встановлено суттєвий

вплив на прояв гістерезису в'язкої течії ступеня заповнення камери та внутрішнього тертя середовища.

Порівняльний аналіз аналітичних та експериментальних результатів [28] дозволив виявити особливості прояву реологічного гістерезису ньютонівської течії в камері обертового барабана. Було співставлено в координатах Re і Fr отримані аналітично в [29] і [19, 20] та експериментально графіки меж переходу режимів течії для $\kappa=0,5$ (рис. 4). Похилі штрихові лінії відповідають камерам обертового барабана незмінного радіуса.

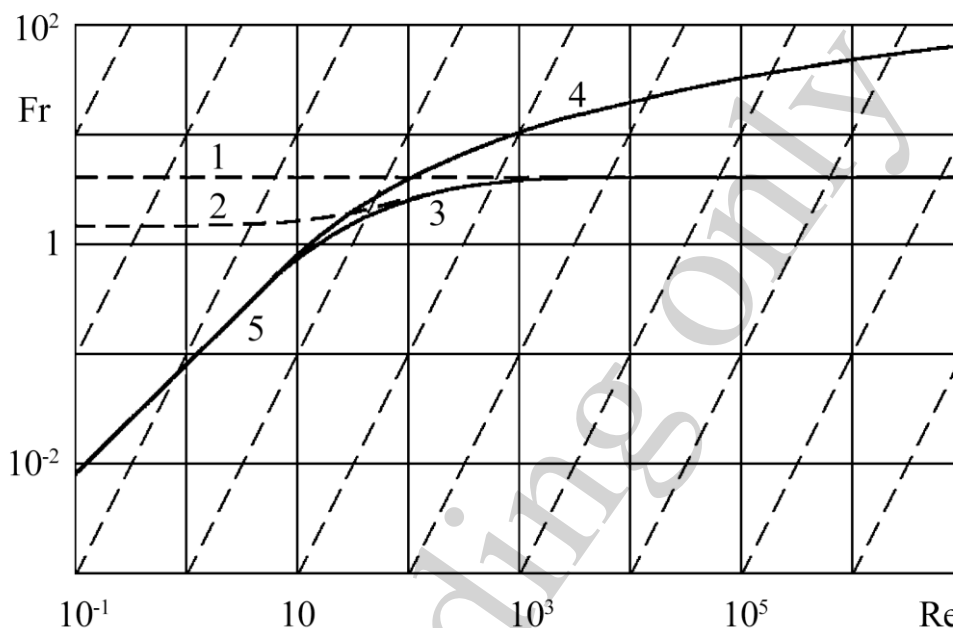


Рис. 4. Діаграма переходу режимів течії ньютонівської рідини в камері обертового барабана для $\kappa=0,5$ (за [28]): 1 – розрахункова межа руйнування пристінкового шару ідеальної абсолютно нев'язкої рідини при сповільненні обертання за [29], 2 – розрахункова межа руйнування шару реальної рідини при сповільненні обертання за [19, 20], 3 – експериментальна межа руйнування шару при сповільненні обертання, 4 – експериментальна межа утворення шару при прискоренні обертання, 5 – спільна експериментальна межа утворення шару, під час прискорення обертання, або руйнування шару, під час сповільнення обертання

Виявилось посилення прояву реологічного гістерезису зі збільшення ступеня заповнення камери рідиною κ [28]. Крім того, в [30] було чисельно встановлено значний вплив числа Рейнольдса на режими течії в обертовій камері. Зокрема експериментально зареєстровано інтенсивний прояв гістерезису у випадку великих Re [28] та стрибкоподібному переході режимів течії (графіки 3, 4 на рис. 4). При цьому виникають хвилеподібні збурення вільної поверхні під час руйнування шару. Натомість гістерезис не проявляється при малих Re . При цьому утворюються вторинні циркуляційні течії у вигляді валика [31] (рис. 5) та плавні неявно виражені переходи режимів руху (графік 5 на рис. 4).

У такому випадку виникає значна деформація вільної поверхні під час утворення або зникнення шару і межі взаємних переходів режимів збігаються.

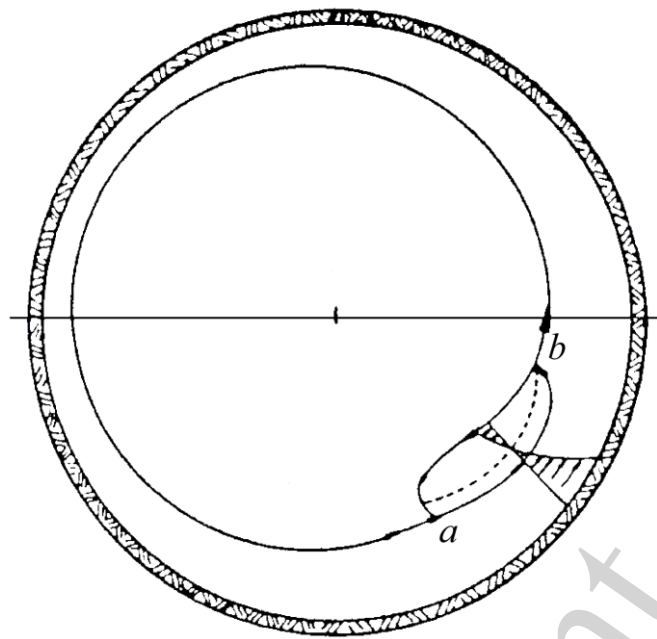


Рис. 5. Схема картини руху в поперечному перерізі обертової камери при розвитку вторинної циркуляційної течії у вигляді валика на вільній поверхні пристінкового шару (за [31])

Однак отримані результати прояву гістерезисних переходів режимів руху стосуються лише однофазного в'язкого рідкого середовища завантаження обертової камери. Натомість прояв можливого гістерезису швидкісних меж утворення та зникнення пристінкового шару двофазного зернистого завантаження залишається нез'ясованим.

Разом з тим було встановлено, що поведінка зернистого завантаження обертового барабана має яскраво виражений нестійкий характер [32]. Така нестійкість часто проявляється у виникненні кластерних угруповань частинок у вигляді смугастих утворень. У роботі [33] зареєстровано прояв фрикційного гістерезису при переході руху незв'язного зернистого матеріалу із неструктурованого стану у структурований. При малому κ виявлено швидкісний гістерезисний взаємний перехід режимів руху у вигляді однорідного пристінкового шару та із радіально-симетричними кільцями.

Огляд реалізації нелінійних переходів різноманітних режимів руху незв'язного зернистого завантаження обертової камери, переважно у прикладанні до барабанних млинів, наведено в [34]. Показано, що такі переходи реалізуються у вигляді фрикційного гістерезису, зумовленого проявом складних, до кінця далеко не вивчених, реологічних властивостей внутрішньокамерного середовища.

Було досліджено один з проявів фрикційного гістерезису, що полягає у переході кутів нахилу вільної поверхні завантаження повільно обертової камери до та після обрушення. Чисельний та експериментальний аналіз реалізації такого гістерезисного переходу при низькій швидкості обертання було здійснено в [35]. Порівняння результатів чисельного моделювання та експериментів гістерезисного переходу кутів нахилу вільної поверхні на початку та після завершення обрушення здійснено в [36]. Показано, що такі фрикційні переходи ви-

кликані виникненням твердотільного, квазірідженого та квазігазоподібного реологічних станів в окремих зонах завантаження. З'ясовано, що реалізація окремих реологічних станів зумовлена швидкістю зсувних потоків незв'язного зернистого завантаження обертового барабана.

Розглядався також інший прояв фрикційного гістерезису руху незв'язного зернистого завантаження обертового барабана. Він полягає у взаємному переході режимів руху із періодичним обрушення вільної поверхні та неперервного потоку при немалій швидкості обертання. У роботі [37] встановлено прояв такого гістерезису на основі застосування чисельної моделі, що описує часткове квазірідження зернистого середовища. Експериментальне дослідження цього гістерезису виконано в [38]. В [39] експериментально вивчався вплив геометричних та фізичних властивостей частинок завантаження на прояв гістерезису. Експериментальний аналіз відмінностей реалізації такого гістерезису в сухих зернистих матеріалах та суспензіях наведено в [40]. Показано, що прояв гістерезису в суспензіях має фрикційний реологічний характер і спричинений міжчастинковим тертям.

В [41] експериментально вивчалися швидкісні межі існування пристінкового шару незв'язного зернистого завантаження камери обертового барабана. Розглядався вплив фізичних властивостей, сферичності і густини матеріалу частинок та внутрішнього і зовнішнього тертя. Було зареєстровано фрикційний гістерезис значення швидкості обертання під час утворення або руйнування пристінкового шару завантаження в залежності від напрямку зміни швидкості. Граничне значення швидкості при прямому переході, під час прискорення обертання, перевищує таке значення при зворотному переході, під час сповільнення обертання. При цьому величина граничної швидкості обертання барабана ω перевищує критичне значення $\omega_c = (g/R)^{0.5}$. Встановлено залежність прояву гістерезису від фізичних властивостей, сферичності та густини матеріалу частинок, а також внутрішнього та зовнішнього тертя завантаження. Виявлено посилення прояву гістерезису зі зменшенням шорсткості поверхні, збільшенням несферичності форми частинок та зниженням тертя завантаження. Проте, при ступені заповнення камери завантаженням більше 0,3, прояв гістерезису був слабовираженим. У цьому випадку різниця швидкісних меж утворення та руйнування пристінкового шару була нехтовно малою. Але залишаються невирішеними питання, пов'язані із проявом реологічного гістерезису руху зв'язного зернистого завантаження обертової камери. Причиною цього є підвищена складність урахування зчіпних властивостей частинок між собою та з поверхнею камери, що спричинюють неоднозначний характер поведінки такого середовища.

У декількох роботах було досліджено прояви реологічних гістерезисних переходів окремих режимів руху зв'язного зернистого завантаження обертового барабана. Прояв гістерезису переходу кутів нахилу вільної поверхні завантаження повільно обертової камери до та після обрушення експериментально вивчався в [42]. Показано значний вплив зчеплення частинок на динаміку течії та такий прояв гістерезису. Збільшення зв'язності підвищує кут нахилу вільної поверхні і товщину шару, що обрушується, та посилює дисипацію кінетичної енергії завантаження. Гістерезисні переходи режимів руху із періодичним обрушення вільної поверхні та неперервного потоку при немалій швидкості обер-

тання експериментально досліджувались в [43, 44]. Показано, що збільшення зчеплення частинок посилює прояв гістерезису внаслідок виникнення явища кластеризації зернистого потоку. Але вплив реологічного гістерезису на умови існування в обертовій камері пристінкового шару зв'язного завантаження, внаслідок об'єктивних труднощів, не було з'ясовано.

Отже отримані дані аналітичного і чисельного моделювання та експериментів засвідчили схожість поведінки зв'язного зернистого завантаження обертового барабана з течіями інших середовищ. Близькими за режимами руху є незв'язний зернистий матеріал та ньютонівська рідина, поведінка яких в камерах машин барабанного типу є доволі добре вивченою. Подібними для цих трьох типів середовищ є режими циркуляційного руху та прояви гістерезисних режимних переходів. Проте такі результати стосуються лише малих швидкостей обертання та низької динамічності процесу взаємодії середовища із камерою барабана. Крім того, вплив зчіпних властивостей частинок на режими руху зв'язного зернистого завантаження залишається до кінця нез'ясованим внаслідок підвищеної складності прояву реологічних характеристик.

Не створено моделей для визначення впливу зчеплення на умови утворення пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження. Це зумовлено непереборними труднощами аналітичного і чисельного моделювання та підвищеною складністю апаратурного експериментального дослідження поведінки зернистого завантаження швидкохідного обертового барабана. Відсутність таких моделей особливо негативно проявляється у випадку реалізації інноваційного процесу подрібнення в барабанно-валкових млинах.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є встановлення впливу динамічних параметрів руху на умови утворення та руйнування на поверхні камери пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження обертового барабана. Це дасть змогу прогнозувати ефективність реалізації процесів переробки зв'язних зернистих матеріалів в машинах барабанного типу з утворенням пристінкового шару внутрішньокамерного завантаження.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- виявити гідродинамічні характеристики течії зв'язного зернистого завантаження в камері обертового барабана при взаємному переході циркуляційного та пристінкового режимів руху;
- оцінити значення динамічних параметрів руху, що відповідають умовам утворення та зникнення пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження на поверхні камери обертового барабана.

4. Матеріали та методи дослідження

4.1. Методика виявлення гідродинамічних характеристик течії зв'язного зернистого завантаження при утворенні пристінкового шару

Як метод дослідження було прийнято експериментальну фізичну візуалізацію картин руху головних типів текучого завантаження камери обертового барабана. За допомогою відеозйомки через прозору торцеву стінку камери фіксува-

лись картини усталеного руху завантаження у стаціонарно обертовому барабані. Розглядалась двовимірна течія у площині, що є перпендикулярною до осі камери. Вважалось, що впливом торцевих стінок на рух завантаження можна знехтувати оскільки довжина циліндричної камери істотно перевищує її довжину.

Було досліджено режими циркуляційного руху, перед утворенням пристінкового шару, для трьох типів текучого завантаження – незв'язного зернистого, ньютонівського рідкого та зв'язного зернистого. Для порівняння особливостей режимів течії, викликаних відмінністю реологічних властивостей середовищ, було реалізовано однакові геометричні та динамічні умови руху. Камери барабанів мали однаковий радіус R та близький ступінь заповнення завантаженням у стані спокою $\kappa=0,4-0,5$. Кінематична в'язкість рідини, що моделювала ньютонівське рідке завантаження, становила $\nu_l=10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. До цієї ж величини наближалось прибілизне значення прийнятого аналога кінематичної в'язкості використаного незв'язного та зв'язного зернистого завантаження – $\nu_g \approx 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Для вимірювання кінематичної в'язкості рідини було застосовано капілярний віскозиметр.

Геометричні характеристики частинок зернистих завантажень оцінювались за їх відносним розміром у камері $\psi_d=d/2R$ (d – середній абсолютний розмір частинок). Відносний розмір частинок сфероподібної форми для незв'язного зернистого завантаження становив $\psi_{dic}=0,0104$. Відносний розмір частинок дисперсного зв'язного завантаження, в якості якого було використано цемент, складав $\psi_{dc} \approx 0,13 \cdot 10^{-3}$. Для вимірювання розміру частинок зернистих матеріалів було використано аналізатор лазерного типу.

Для подальшого порівняльного аналізу було отримано по 4–5 картин руху кожного типу завантаження за зростанням швидкості обертання.

Крім того, було досліджено особливості завершення переходу циркуляційного режиму руху зв'язного зернистого завантаження у режим пристінкового шару під час прискорення обертання. Було застосовано 3 барабана із камерами різного радіуса. Відносні розміри частинок дисперсного зв'язного завантаження (цементу) у цих камерах складали $\psi_{dc} \approx 0,065 \cdot 10^{-3}$, $0,092 \cdot 10^{-3}$ та $0,13 \cdot 10^{-3}$. Дискретні значення ступеня заповнення камери становили $\kappa=0,3, 0,5, 0,7$ та $0,9$. Для дозування порції текучого завантаження камери барабана використовувались лабораторні мензурки. Об'єм зернистого завантаження визначався у стані спокою, без ущільнення при заповненні мірної камери.

4. 2. Методика оцінювання динамічних параметрів руху при утворенні пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження

Як метод дослідження було прийнято експериментальну фізичну візуалізацію перехідних режимів руху зв'язного зернистого завантаження камери обертового барабана. За допомогою безпосереднього зорового візуального спостереження через прозору торцеву стінку камери фіксувались взаємні переходи режимів руху завантаження при плавній зміні швидкості обертання. Перехід циркуляційного режиму руху в режим у вигляді пристінкового шару реєструвався при плавному збільшенні швидкості обертання. Зворотній перехід режиму у вигляді пристінкового шару в циркуляційний режим реєструвався при плавному зменшенні швидкості обертання.

Фіксувались значення кутової швидкості ω_d , що відповідає утворенню пристінкового шару при прискоренні обертання, та швидкості ω_{dl} , що відповідає руйнуванню шару при сповільненні обертання. Для вимірювання швидкості обертання завантаженого барабана було використано тахометр стробоскопічного типу. Значення швидкості стаціонарного обертання барабана при усталеному русі текучого завантаження камери постійно перевірялось, для переконливості у правильності вимірювань. При використанні аналізу розповсюдження помилок похибка вимірювань швидкості становила приблизно $\pm 3\%$. Оцінка здійснювалась шляхом вимірювання стаціонарної швидкості обертання 5 разів для одного усталеного режиму руху завантаження.

Як зв'язний зернистий матеріал внутрішньокамерного завантаження було прийнято цемент.

Було застосовано 9 барабанів із камерами різних радіусів, значення яких утворюють послідовність чисел, що складають геометричну прогресію зі знаменником $2^{0.5}$. Відносні розміри частинок дисперсного зв'язного завантаження у цих камерах складали $\psi_{dc} \approx 0,065 \cdot 10^{-3}$, $0,092 \cdot 10^{-3}$, $0,13 \cdot 10^{-3}$, $0,18 \cdot 10^{-3}$, $0,26 \cdot 10^{-3}$, $0,37 \cdot 10^{-3}$, $0,52 \cdot 10^{-3}$, $0,74 \cdot 10^{-3}$ та $1,04 \cdot 10^{-3}$.

Для виявлення можливого прояву реологічного гістерезису переходу режимів руху зв'язного завантаження було прийнято немалі значення ступеня заповнення камери – $k \geq 0,3$. Значення ступеня заповнення становили $k=0,3$, $0,5$, $0,7$ та $0,9$.

5. Результати дослідження утворення пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження

5.1. Результати виявлення гідродинамічних характеристик течії зв'язного зернистого завантаження при утворенні пристінкового шару

Отримані картини усталеного циркуляційного режиму руху трьох типів текучого завантаження у камері стаціонарно обертового барабана наведено на рис. 6–9. Картини руху для незв'язного зернистого завантаження зображено на рис. 6, для ньютонівського рідкого – на рис. 7, 8, для зв'язного зернистого – на рис. 9.

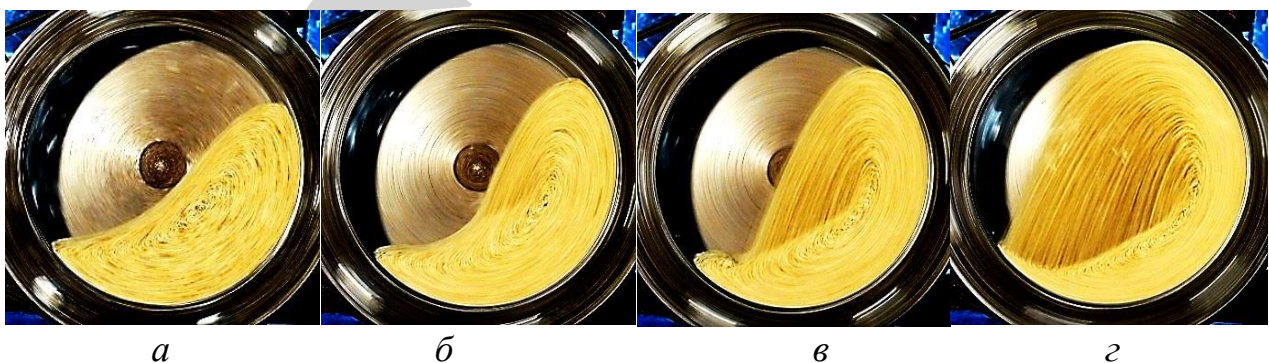


Рис. 6. Картини циркуляційного режиму руху незв'язного зернистого завантаження при відносному розмірі частинок $\psi_{dic}=0,0104$ та ступені заповнення камери $k=0,4$: а – $Re=32,4$, $Fr=0,09$; б – $Re=75,7$, $Fr=0,49$; в – $Re=91,9$, $Fr=0,723$; г – $Re=108$, $Fr=1$

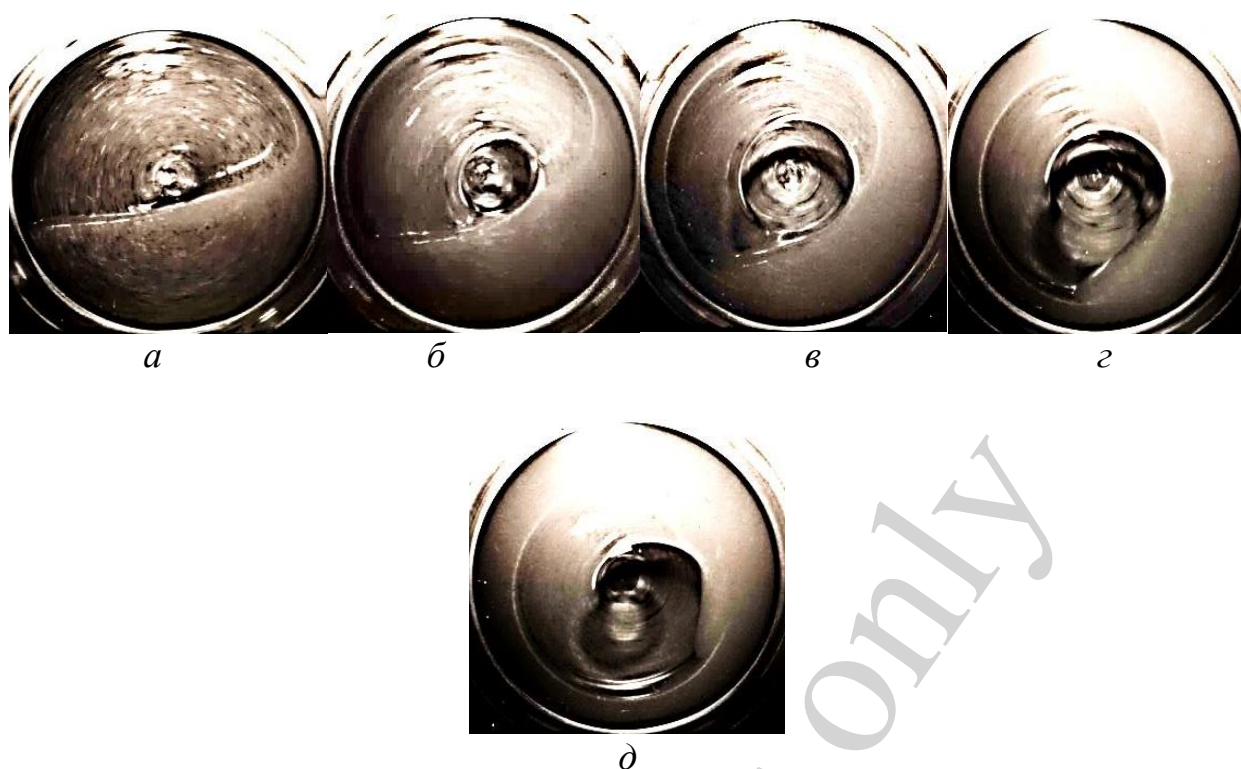


Рис. 7. Картини циркуляційного режиму течії ньютонівського рідкого завантаження при ступені заповнення камери $\kappa=0,5$: *а* – $Re=43,5$, $Fr=0,162$; *б* – $Re=88,2$, $Fr=0,666$; *в* – $Re=132$, $Fr=1,48$; *г* – $Re=176$, $Fr=2,66$; *д* – $Re=203$, $Fr=3,54$

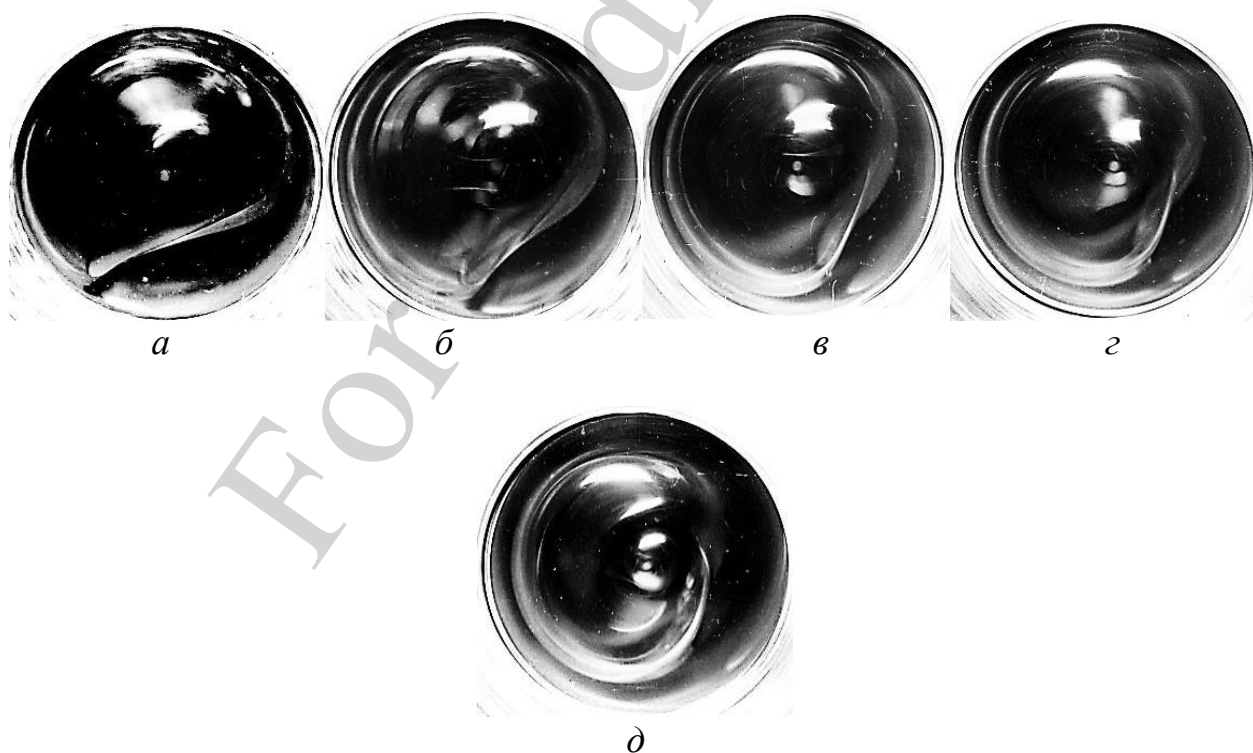


Рис. 8. Картини вторинної течії ньютонівської рідини в обертовій камері при $\kappa=0,3$: *а* – $Re=1,54$, $Fr=0,0131$; *б* – $Re=2,94$, $Fr=0,0473$; *в* – $Re=4,41$, $Fr=0,107$; *г* – $Re=5,81$, $Fr=0,185$; *д* – $Re=7,28$, $Fr=0,29$



Рис. 9. Картини циркуляційного режиму руху зв'язного зернистого завантаження при відносному розмірі частинок $\psi_{dc} \approx 0,13 \cdot 10^{-3}$ та ступені заповнення камери $\kappa=0,4$: а – $Re=75,7$, $Fr=0,49$; б – $Re=115$, $Fr=1,12$; в – $Re=137$, $Fr=1,61$; г – $Re=153$, $Fr=2,02$

Експериментальні картини руху на рис. 7–9 характеризують вплив реологічних властивостей трьох типів завантаження на взаємний перехід циркуляційного режиму течії у пристінковий шар.

Отримані картини завершення переходу циркуляційного режиму руху зв'язного зернистого завантаження у режим пристінкового шару під час прискорення обертання наведено на рис. 10–13. Картини руху для ступеня заповнення камери $\kappa=0,3$ зображено на рис. 10, для $\kappa=0,5$ – на рис. 11, для $\kappa=0,7$ – на рис. 12 та для $\kappa=0,9$ – на рис. 13.

Експериментальні картини руху на рис. 10–13 характеризують особливості течії зв'язного зернистого завантаження при завершенні переходу циркуляційного у режим пристінкового шару під час прискорення обертання.

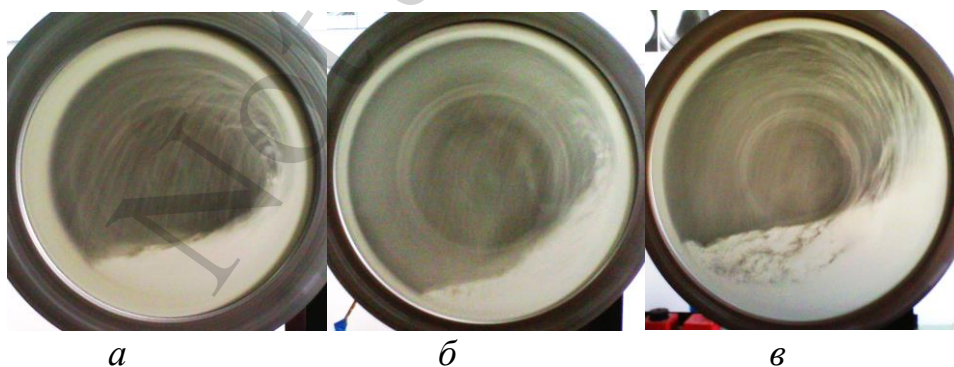


Рис. 10. Картини завершення переходу циркуляційного режиму руху зв'язного зернистого завантаження у режим пристінкового шару під час прискорення обертання при $\kappa=0,3$: а – $\psi_{dc} \approx 0,13 \cdot 10^{-3}$, $Re=156$, $Fr=2,09$; б – $\psi_{dc} \approx 0,092 \cdot 10^{-3}$, $Re=276$, $Fr=2,3$; в – $\psi_{dc} \approx 0,065 \cdot 10^{-3}$, $Re=504$, $Fr=2,72$

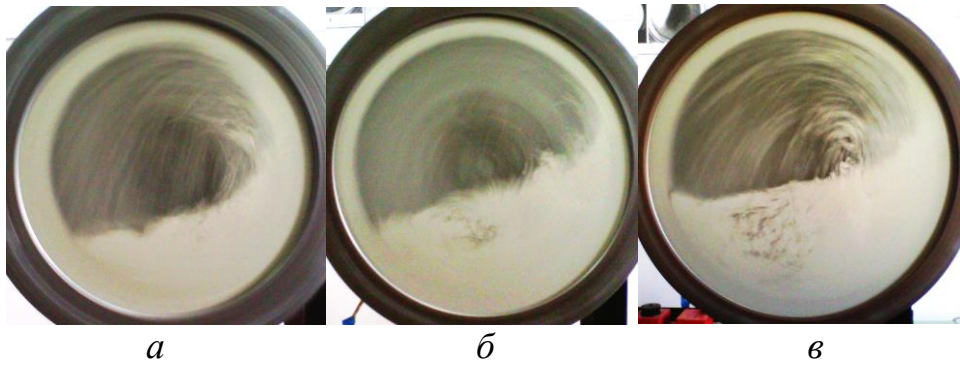


Рис. 11. Картини завершення переходу циркуляційного режиму руху зв'язного зернистого завантаження у режим пристінкового шару під час прискорення обертання при $\kappa=0,5$: *а* – $\psi_{dc} \approx 0,13 \cdot 10^{-3}$, $Re=141$, $Fr=1,7$; *б* – $\psi_{dc} \approx 0,092 \cdot 10^{-3}$, $Re=247$, $Fr=1,85$; *в* – $\psi_{dc} \approx 0,065 \cdot 10^{-3}$, $Re=439$, $Fr=2,06$

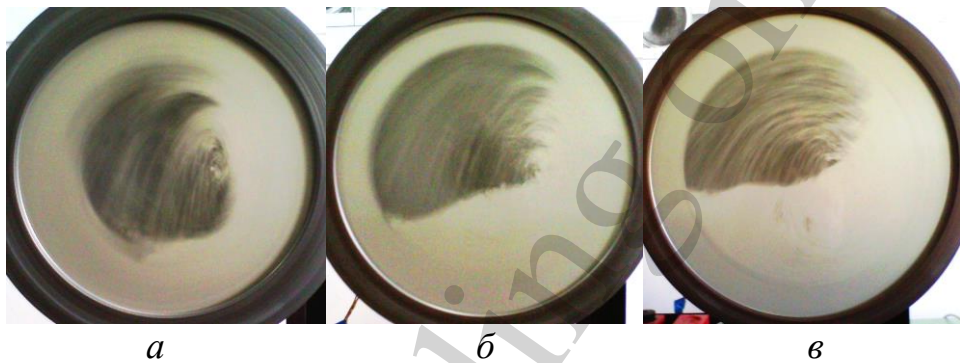


Рис. 12. Картини завершення переходу циркуляційного режиму руху зв'язного зернистого завантаження у режим пристінкового шару під час прискорення обертання при $\kappa=0,7$: *а* – $\psi_{dc} \approx 0,13 \cdot 10^{-3}$, $Re=138$, $Fr=1,64$; *б* – $\psi_{dc} \approx 0,092 \cdot 10^{-3}$, $Re=241$, $Fr=1,76$; *в* – $\psi_{dc} \approx 0,065 \cdot 10^{-3}$, $Re=419$, $Fr=1,88$

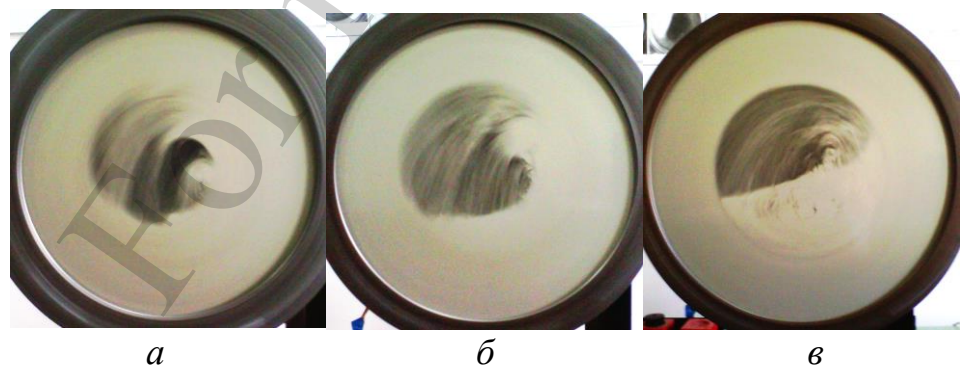


Рис. 13. Картини завершення переходу циркуляційного режиму руху зв'язного зернистого завантаження у режим пристінкового шару під час прискорення обертання при $\kappa=0,9$: *а* – $\psi_{dc} \approx 0,13 \cdot 10^{-3}$, $Re=148$, $Fr=1,87$; *б* – $\psi_{dc} \approx 0,092 \cdot 10^{-3}$, $Re=262$, $Fr=2,08$; *в* – $\psi_{dc} \approx 0,065 \cdot 10^{-3}$, $Re=472$, $Fr=2,38$

5. 2. Результати оцінювання динамічних параметрів руху при утворенні пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження

Графіки отриманих результатів експериментального визначення меж взаємного переходу циркуляційного та режиму пристінкового шару руху зв'язного зернистого завантаження обертового барабана наведено на рис. 14–17. Було встановлено меж утворення режиму пристінкового шару при прискоренні обертання ω_{fl} та меж руйнування режиму пристінкового шару при сповільненні обертання ω_{dl} . Графіки меж для ступеня заповнення камери $\kappa=0,3$ зображено на рис. 14, для $\kappa=0,5$ – на рис. 15, для $\kappa=0,7$ – на рис. 16 та для $\kappa=0,9$ – на рис. 17.

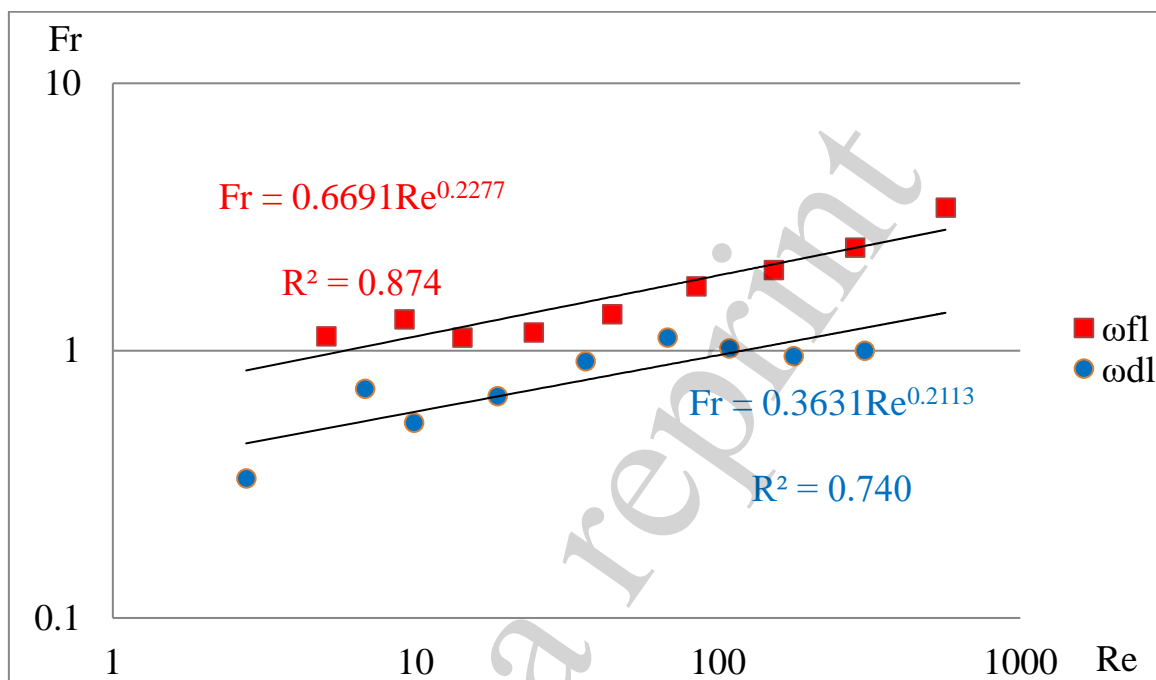


Рис. 14. Експериментальні межі переходу режимів руху зв'язного зернистого завантаження обертового барабана ω_{fl} та ω_{dl} для ступеня заповнення камери $\kappa=0,3$

Як апроксимуючі для залежностей меж ω_{fl} та ω_{dl} в координатах Re і Fr було вибрано степеневі функції. У логарифмічних шкалах Re і Fr такі степеневі залежності набувають лінійного вигляду (рис. 14–17).

Експериментальні залежності меж переходу режимів течії ω_{fl} та ω_{dl} характеризують вплив динамічних параметрів руху на утворення та руйнування пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження.

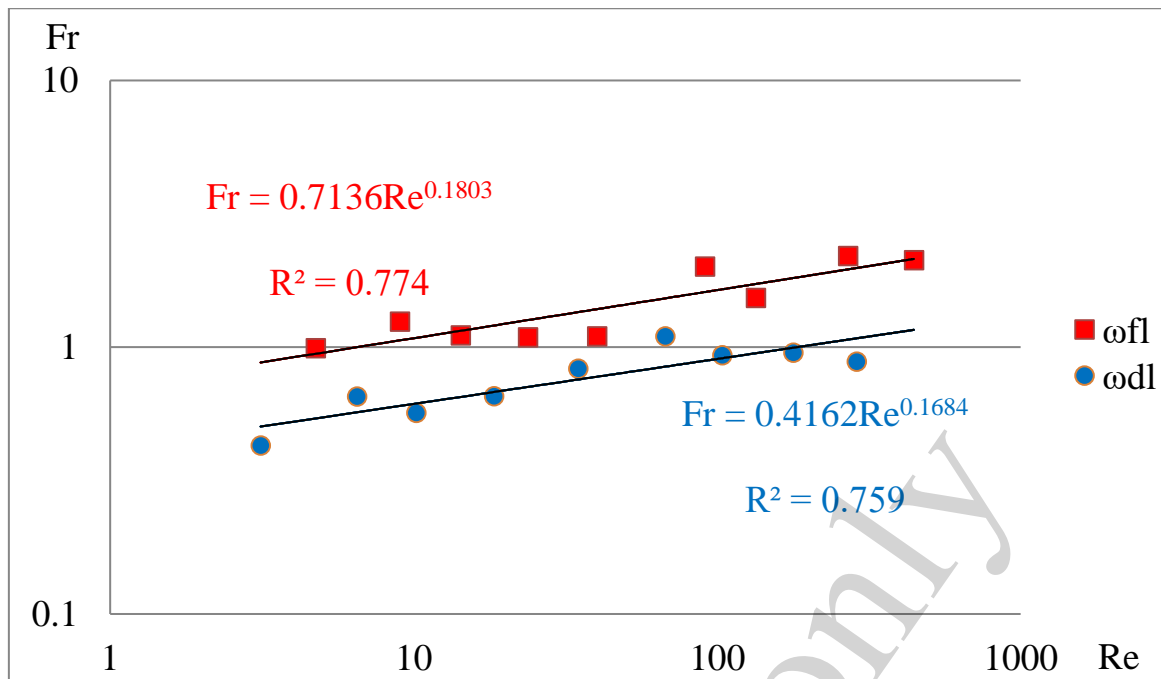


Рис. 15. Експериментальні межі переходу режимів руху зв'язного зернистого завантаження обертового барабана ω_{fl} та ω_{dl} для ступеня заповнення камери $\kappa=0,5$

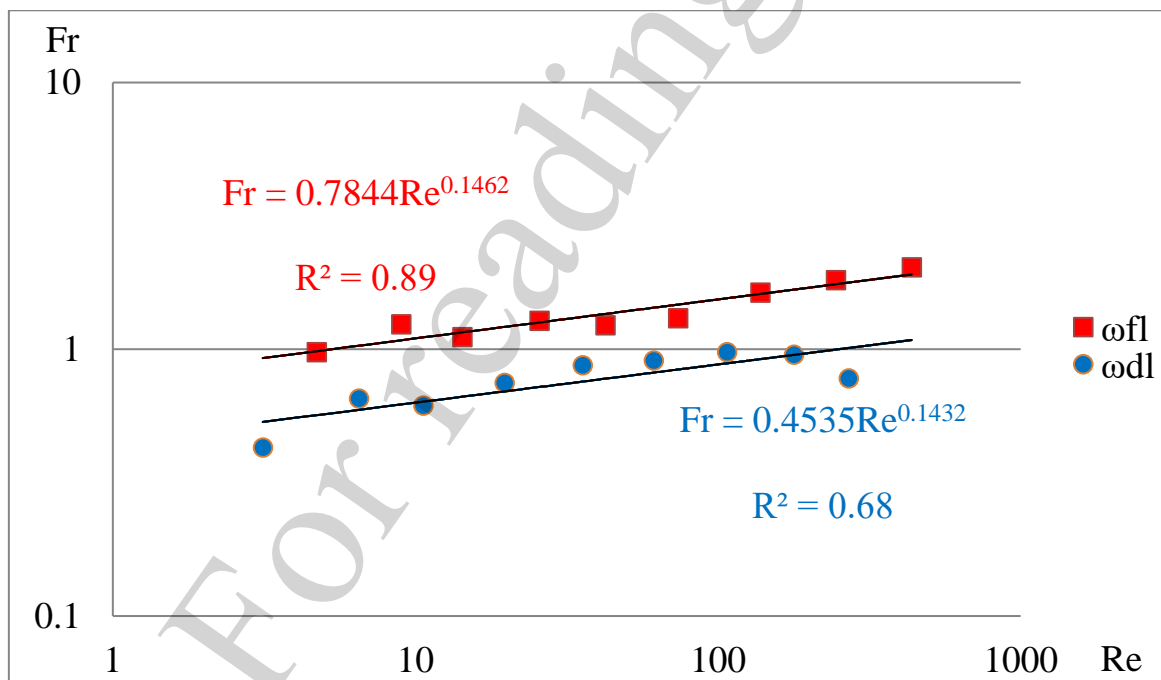


Рис. 16. Експериментальні межі переходу режимів руху зв'язного зернистого завантаження обертового барабана ω_{fl} та ω_{dl} для ступеня заповнення камери $\kappa=0,7$

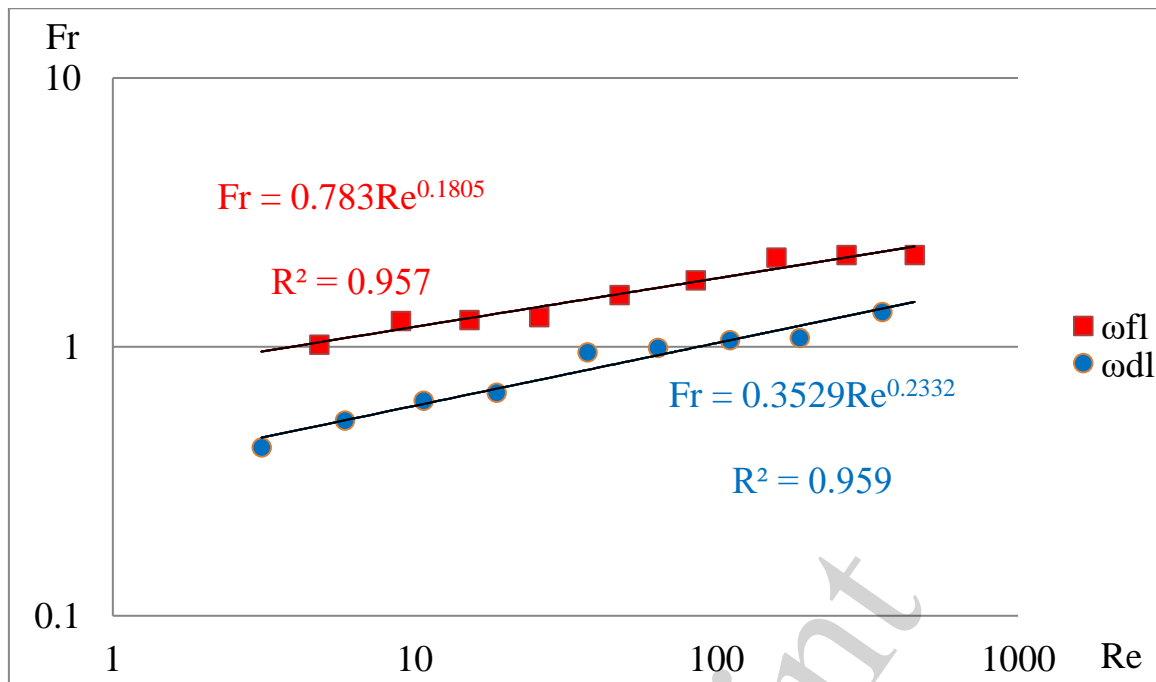


Рис. 17. Експериментальні межі переходу режимів руху зв'язного зернистого завантаження обертового барабана для ω_{fl} та ω_{dl} ступеня заповнення камери $\kappa=0,9$

6. Обговорення результатів дослідження умов течії при утворенні пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження

Отримані результати експериментальної візуалізації течії і чисельні дані дозволили якісно та кількісно оцінити вплив зв'язності на утворення пристінкового шару зернистого завантаження.

Візуальний якісний аналіз картин руху на рис. 6–9 наочно демонструє особливості реалізації циркуляційної течії зв'язного зернистого завантаження порівняно з незв'язним та рідким. Встановлено, що зв'язні властивості істотно посилюють ефект квазізрідження зернистого завантаження обертової камери. Таке зрідження зв'язного зернистого матеріалу зумовлено зчепленням між шарами та з поверхнею камери, за аналогією зі злипанням шарів та налипання на тверду стінку для рідини. Зазначене послаблює схожість поведінки зв'язного зернистого завантаження (рис. 9) із рухом незв'язного зернистого матеріалу (рис. 6) та посилює схожість із течією рідини (рис. 7, 8).

Картини циркуляційного режиму руху зв'язного зернистого завантаження (рис. 9) суттєво відрізняються від картин руху для незв'язного (рис. 1, 6). Внаслідок зчеплення між частинками зв'язного зернистого завантаження спотворюється трифазний режим руху, характерний для незв'язного. Зокрема при русі зв'язного завантаження (рис. 9) не виникає режимів руху з частковим підкиданням (рис. 1, б), з повним підкиданням (рис. 1, в) та неповного центрифугування (рис. 1, г). Частка зони невірального падіння для зв'язного зернистого завантаження (рис. 9, в) є значно меншою за таку частку для незв'язного (рис. 6, г). Кути підйому α та нахилу вільної поверхні θ для зв'язного зернистого завантаження (рис. 9) є суттєво меншими за такі кути для незв'язного (рис. 1, а, б).

Проте найголовнішим є принципова відмінність гідродинамічних характеристик течії при утворення пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження від таких характеристик для незв'язного. Виявляється утворення пристінкового шару зв'язного завантаження (рис. 9, *г*, 10–13) відбувається без виникнення режиму руху із повним підкиданням, характерного для незв'язного (рис. 1, *г*).

Разом з тим, картини циркуляційного режиму руху зв'язного зернистого завантаження (рис. 9) істотно наближаються до картин течії рідини (рис. 7, 8). Зчеплення зв'язного зернистого завантаження спричинює зниження рухливості та взаємного зштовхування частинок внаслідок дисипації кінетичної енергії. Невільний відносний рух окремих частинок, внаслідок кластеризації потоку, перетворюється на переміщення окремих кластерних угруповань. Підвищується однорідність зернистого потоку внаслідок посилення щільності упаковки частинок. Зсувний циркуляційний рух зернистого завантаження перетворюється на квазіплунжерний потік зі сповзанням та перекочуванням без відносного руху частинок (рис. 9) аналогічно до течії рідини (рис. 7, 8). Зсувні напруження, що виникають у такому щільному однорідному кластерізованому зернистому потоці, проявляються у вигляді мікротріщин (рис. 9). Збільшується товщина шару, що сповзає, та відстань від вільної поверхні до центра циркуляції завантаження. Виникнення аналогу поверхневого натягу зв'язного завантаження спричинює зменшення вгнутості та посилення опуклої форми вільної поверхні (рис. 9). Зона невилітного падіння зв'язного зернистого завантаження (рис. 9, *в*) трансформується у вихровий валик, як при течії рідини (рис. 7 *б*, *в*, 8).

Аналіз рис. 7–13 засвідчує аналогічність гідродинамічних умов переходу циркуляційного режиму руху у режим пристінкового шару для зв'язного зернистого та рідкого завантаження. Із прискоренням обертання товщина пристінкового шару зв'язного завантаження плавно зростає при циркуляційному русі решти у нижній частині камери (рис. 9, *г*, 10–13), подібно течії рідини (рис. 7, *г*, *д*, 8).

Кількісний аналіз графіків на рис. 14–17 дозволяє виявити закономірності зміни динамічних параметрів руху при утворенні та руйнуванні пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження.

Було зареєстровано стійкий прояв реологічного гістерезису руху зв'язного завантаження обертової камери, що є властивим для течії рідкого завантаження. Гістерезис полягає у перевищенні значення швидкісної межі утворення пристінкового шару при прискоренні обертання ω_{fl} над значенням межі руйнування шару при сповільненні обертання ω_{dl} . Зокрема, значення числа Фруда для межі ω_{fl} перевищує таке значенням для межі ω_{dl} . Встановлено, що прояв гістерезису, як різниця меж значенням Fr для ω_{fl} та ω_{dl} , переважно посилюється зі збільшенням числа Рейнольдса. Інтенсивність посилення прояву гістерезису зростає зі зменшенням ступеня заповнення камери k . Виявлено також зростання значення Fr окремо для кожної межі ω_{fl} та ω_{dl} зі збільшенням Re .

У розглядуваному діапазоні $Re=30-500$ величина числа Фруда Fr для межі ω_{fl} становить $Fr=1-2,9$, а для межі ω_{dl} $Fr=0,5-1,4$. Величина Fr для межі ω_{dl} перевищує значення 1 при $Re=100-250$. Перевищення значення Fr для межі ω_{fl} над таким значенням для межі ω_{dl} становить 1,6–2,1 рази.

Отримані результати щодо ефекту реологічного гістерезису руху зв'язного зернистого завантаження дозволили встановити можливість підвищення ефективності процесу подрібнення в барабанно-валкових млинах. Виявилось, що у період подавання матеріалу в камеру та формування пристінкового шару швидкість обертання необхідно підтримувати не нижче межі утворення шару при прискоренні обертання ω_{fl} . Натомість у період подрібнення прокатуванням під валком швидкість обертання можна зменшити не нижче межі руйнування шару при сповільненні обертання ω_{dl} . Це дозволяє суттєво знизити енергоємність помелу та динамічне навантаження за рахунок обертання барабана із мінімально можливою швидкістю, достатньою для збереження пристінкового шару матеріалу.

Застосовність отриманих результатів визначається такими основними прийнятими обмеженнями. Зв'язний зернистий матеріал внутрішньокамерного завантаження моделювався цементом із прийнятим аналогом кінематичної в'язкості $\nu_g \approx 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Було використано 9 барабанів із камерами різних радіусів при діапазонах зміни відносного розміру частинок дисперсного зв'язного завантаження $\psi_{dc} \approx (0,065 - 1,04) \cdot 10^{-3}$ та числа Рейнольдса $Re = 30 - 500$. Об'ємний ступінь заповнення камери барабана частинками зв'язного зернистого завантаження у стані вільного спокою мав дискретні значення $\kappa = 0,3, 0,4, 0,5, 0,7$ та $0,9$.

До недоліків застосованого підходу оцінювання впливу зв'язності на утворення пристінкового шару зернистого завантаження можна віднести неврахування біфуркаційних значень керуючих параметрів барабанної машини.

У подальшому доцільно з'ясувати якісний та кількісний вплив на динамічні і технологічні параметри процесу можливих автоколивань завантаження. Це дозволить встановити раціональні умови реалізації процесу подрібнення зв'язних зернистих матеріалів у барабанно-валкових млинах за умови самозбудження пульсацій завантаження.

7. Висновки

1. Встановлено, що зв'язність зернистого завантаження обертового барабана послаблює схожість його поведінки із рухом незв'язного завантаження та посилює схожість із течією рідини. При цьому трифазний режим руху зернистого завантаження в обертовій камері спотворюється. Перехід циркуляційної течії у режим пристінкового шару, під час прискорення обертання, відбувається шляхом плавного зростання товщини шару при циркуляції решти завантаження у нижній частині камери. Зазначене спричинено виникненням зчеплення між шарами зв'язного зернистого завантаження та з поверхнею камери. Це зумовлено проявом встановленого гідродинамічного ефекту квазізрідження зернистого завантаження під впливом зв'язності.

2. Встановлено, що швидкісна межа ω_{fl} утворення пристінкового шару зв'язного зернистого завантаження, при прискоренні обертання, перевищує межу ω_{dl} руйнуванні шару, при сповільненні обертання. Різниця між значеннями числа Фруда для цих меж переважно зростає зі збільшенням числа Рейнольдса. Інтенсивність зростання такої різниці підвищується зі зменшенням ступеня заповнення камери. Значення Fr для кожної з цих меж зростає зі збільшенням Re . При відносному розмірі частинок зв'язного зернистого завантаження

$\psi_{dc} \approx (0,065-1,04) \cdot 10^{-3}$ та $Re=30-500$ значення Fr для межі ω_{fl} становить 1–2,9, а для межі $\omega_{dl} - Fr=0,5-1,4$. Величина Fr для межі ω_{dl} переходить значення 1 при $Re=100-250$. Перевищення значення Fr для межі ω_{fl} над таким значення для межі ω_{dl} становить 1,6–2,1 рази. Це зумовлено стійким проявом встановленого ефекту реологічного гістерезису руху зв'язного зернистого завантаження обертової камери внаслідок квазізрідження зернистого середовища під впливом зв'язності.

Література

1. Chen, Y. Q., Li, X. X., Sun, G. Y. (2015). Reviewing on the working mechanism of horizontal roller mill based on the rule of layer material crushing. 2015 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (IC-CSNT), 1534–1536. doi: <https://doi.org/10.1109/iccsnt.2015.7491021>
2. Brewster, R., Grest, G. S., Levine, A. J. (2009). Effects of cohesion on the surface angle and velocity profiles of granular material in a rotating drum. *Physical Review E*, 79 (1). doi: <https://doi.org/10.1103/physreve.79.011305>
3. Liu, P. Y., Yang, R. Y., Yu, A. B. (2011). Dynamics of wet particles in rotating drums: Effect of liquid surface tension. *Physics of Fluids*, 23 (1), 013304. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3543916>
4. Kasper, J. H., Magnanimo, V., Jarray, A. (2019). Dynamics of discrete wet granular avalanches in a rotary drum. *Proceedings of the 8th International Conference on Discrete Element Methods (DEM8)*. URL: <https://mercurylab.co.uk/dem8/wp-content/uploads/sites/4/2019/07/99.pdf>
5. Kasper, J. H., Magnanimo, V., de Jong, S. D. M., Beek, A., Jarray, A. (2021). Effect of viscosity on the avalanche dynamics and flow transition of wet granular matter. *Particuology*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2020.12.001>
6. Hagen, T., Luding, S., van der Meer, D., Magnanimo, V., Jarray, A. (2021). Liquid migration in flowing granular materials. *EPJ Web of Conferences*, 249, 09001. doi: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124909001>
7. Xu, Q., Orpe, A. V., Kudrolli, A. (2007). Lubrication effects on the flow of wet granular materials. *Physical Review E*, 76 (3). doi: <https://doi.org/10.1103/physreve.76.031302>
8. Wojtkowski, M., Imole, O. I., Ramaioli, M., Chávez Montes, E., Luding, S. (2013). Behavior of cohesive powder in rotating drums. *AIP Conference Proceedings*, 1542, 983. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4812098>
9. Jarray, A., Magnanimo, V., Ramaioli, M., Luding, S. (2017). Scaling of wet granular flows in a rotating drum. *EPJ Web of Conferences*, 140, 03078. doi: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714003078>
10. Jarray, A., Magnanimo, V., Luding, S. (2019). Wet granular flow control through liquid induced cohesion. *Powder Technology*, 341, 126–139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.045>
11. Mellmann, J. (2001). The transverse motion of solids in rotating cylinders – forms of motion and transition behavior. *Powder Technology*, 118 (3), 251–270. doi: [https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(00\)00402-2](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(00)00402-2)

12. Watanabe, H. (1999). Critical rotation speed for ball-milling. *Powder Technology*, 104 (1), 95–99. doi: [https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(99\)00031-5](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(99)00031-5)
13. Juarez, G., Chen, P., Lueptow, R. M. (2011). Transition to centrifuging granular flow in rotating tumblers: a modified Froude number. *New Journal of Physics*, 13 (5), 053055. doi: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/5/053055>
14. Benedito, W. M., Duarte, C. R., Barrozo, M. A. S., Santos, D. A. (2021). Cataracting-centrifuging transition investigation using nonspherical and spherical particles in a rotary drum through CFD simulations. *Particuology*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.03.012>
15. Naumenko, Y. (2017). Modeling a flow pattern of the granular fill in the cross section of a rotating chamber. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (89)), 59–69. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110444>
16. Naumenko, Y. (2017). Modeling of fracture surface of the quasi solid-body zone of motion of the granular fill in a rotating chamber. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (86)), 50–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96447>
17. Naumenko, Y., Sivko, V. (2017). The rotating chamber granular fill shear layer flow simulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (7 (88)), 57–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107242>
18. Naumenko, Y. V. (2000). Stability of the tubular layer of a deformed material in a rotating horizontal cylinder. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 41 (1), 108–114. doi: <https://doi.org/10.1007/bf02465244>
19. Naumenko, Y. V. (1993). Velocity regimes of motion of a viscous liquid in a horizontal rotating cylinder. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 64 (5), 453–459. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00862634>
20. Naumenko, Y. V. (1996). Stability of a Tube of a Viscous Fluid in a Horizontal Rotating Cylinder. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 23 (3-4), 271–277. doi: <https://doi.org/10.1615/interjfluidmechres.v23.i3-4.100>
21. White, R. E. (1956). Residual condensate, condensate behaviour, and siphoning in paper driers. *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 39, 228.
22. White, R. E., Higgins, T. W. (1958). Effect of fluid properties on condensate behaviour. *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 41 (2), 71–76.
23. Preziosi, L., Joseph, D. D. (1988). The run-off condition for coating and rimming flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 187, 99–113. doi: <https://doi.org/10.1017/s0022112088000357>
24. Johnson, R. E. (1988). Steady-state coating flows inside a rotating horizontal cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 190, 321–342. doi: <https://doi.org/10.1017/s0022112088001338>
25. Chew, J. W. (1996). Analysis of the oil film on the inside surface of an aero-engine bearing chamber housing. *ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, 96-GT-300, V001T01A082. doi: <https://doi.org/10.1115/96-gt-300>
26. Thoroddsen, S. T., Mahadevan, L. (1997). Experimental study of coating flows in a partially-filled horizontally Rotating cylinder. *Experiments in Fluids*, 23 (1), 1–13. doi: <https://doi.org/10.1007/s003480050080>

27. Ivanova, A. A., Kozlov, V. G., Chigrakov, A. V. (2004). Dynamics of a Fluid in a Rotating Horizontal Cylinder. *Fluid Dynamics*, 39 (4), 594–604. doi: <https://doi.org/10.1023/b:flui.0000045675.82694.6c>
28. Naumenko, Y. V. (2004). The Regime Hysteresis of Viscous Flow with Free Surface in Rotating Horizontal Cylinder. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 31 (4), 358–368. doi: <https://doi.org/10.1615/interjfluidmechres.v31.i4.50>
29. Phillips, O. M. (1960). Centrifugal waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 7 (3), 340–352. doi: <https://doi.org/10.1017/s0022112060000128>
30. Naumenko, Yu. V. (2001). Numerical calculation of the flow regimes of a fluid partially filling a horizontal rotating heat-exchange cylinder. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 74, 736–744. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1016728915801>
31. Deiber, J. A., Cerro, R. L. (1976). Viscous Flow with a Free Surface Inside a Horizontal Rotating Drum. I. Hydrodynamics. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 15 (2), 102–110. doi: <https://doi.org/10.1021/i160058a004>
32. Seiden, G., Thomas, P. J. (2011). Complexity, segregation, and pattern formation in rotating-drum flows. *Reviews of Modern Physics*, 83 (4), 1323–1365. doi: <https://doi.org/10.1103/revmodphys.83.1323>
33. Breu, A. P. J., Kruelle, C. A., Rehberg, I. (2003). Pattern formation in a rotating aqueous suspension. *Europhysics Letters (EPL)*, 62 (4), 491–497. doi: <https://doi.org/10.1209/epl/i2003-00379-x>
34. Govender, I. (2016). Granular flows in rotating drums: A rheological perspective. *Minerals Engineering*, 92, 168–175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.03.021>
35. On dense granular flows (2004). *The European Physical Journal E*, 14 (4), 341–365. doi: <https://doi.org/10.1140/epje/i2003-10153-0>
36. Forterre, Y., Pouliquen, O. (2008). Flows of Dense Granular Media. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40 (1), 1–24. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102142>
37. Aranson, I. S., Tsimring, L. S. (2002). Continuum theory of partially fluidized granular flows. *Physical Review E*, 65 (6). doi: <https://doi.org/10.1103/physreve.65.061303>
38. Ouyang, H. W., Huang, L. H., Cheng, L., Huang, S. C., Wang, Q., Liu, Z. M., Zhang, X. (2013). Behavior of hysteretic transition of granular flow regimes in a slow rotating drum. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 18 (2), 155–162.
39. Balmforth, N. J., McElwaine, J. N. (2018). From episodic avalanching to continuous flow in a granular drum. *Granular Matter*, 20 (3). doi: <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0822-1>
40. Perrin, H., Clavaud, C., Wyart, M., Metzger, B., Forterre, Y. (2019). Interparticle Friction Leads to Nonmonotonic Flow Curves and Hysteresis in Viscous Suspensions. *Physical Review X*, 9 (3). doi: <https://doi.org/10.1103/physrevx.9.031027>
41. Santos, D. A., Scatena, R., Duarte, C. R., Barrozo, M. A. S. (2016). Transition phenomenon investigation between different flow regimes in a rotary

drum. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 33 (3), 491–501. doi: <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20160333s20150128>

42. Chou, S. H., Hsiao, S. S. (2011). Experimental analysis of the dynamic properties of wet granular matter in a rotating drum. Powder Technology, 214 (3), 491–499. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.09.010>

43. Tegzes, P., Vicsek, T., Schiffer, P. (2002). Avalanche Dynamics in Wet Granular Materials. Physical Review Letters, 89 (9). doi: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.89.094301>

44. Tegzes, P., Vicsek, T., Schiffer, P. (2003). Development of correlations in the dynamics of wet granular avalanches. Physical Review E, 67 (5). doi: <https://doi.org/10.1103/physreve.67.051303>

Not a reprint